

布反射の解析に基づく反射モデルパラメータの推定

布反射の解析に基づく反射モデルパラメータの推定

A Parameter Estimation of the Reflection Model
by Means of a Reflection Analysis of Woven Fabrics

坂 上 ちえ子
SAKAGAMI Chieko

Summary

In this paper, we propose analyzing the reflection characteristics of fabric surface and estimating the model parameters. Off-specular peaks have been observed for roughened surface, and the phenomenon was in very agreement with Y that was calculated by results of a goniospectrophotometer, which is to say the reflectance data of fabric. Then, the multiple regression analysis and the path analysis were tried to clarify the phenomenon and the reflection mechanism of roughened fabric surface. In the previous study, Luminance of Fabric (L.F.), Luminance of Weaving Yarn (L.W.Y.), Surface Roughness (S.R.), Amplitude (A.), and Frequency (F.) were statistically extracted from relative luminance of minute fabric surface, which were captured by a microscope. In this investigation they were analyzed as independent variables in the multiple regression analysis for respective experiment samples. As a result, predicted values calculated by predictive equation were fitted to Y in all experiment samples, and almost of residual errors were low. In addition, we tried to analyze reflection of fabric by the path analysis by using standard partial regression coefficient which was separated out by the multiple regression analysis, and these results showed that the mechanisms of reflection in all experiment samples became clear.

Keywords: *reflection analysis of woven fabric, reflection model parameter, multiple regression analysis, path analysis*

1. はじめに

表面が滑らかな物体と布とでは見え方に違いがあり、それは表面での反射特性が相違するためである。しかし、布は繊維や織組織が微細で、その特性を捉える反射測定が困難だとされ、布の反射光に関わる詳細なデータは少ない。また、反射モデルや関係するパラメータも明らかになっていない。

反射光に関する先行研究は数多くあり、三次元CGの表現では、Lambertモデル¹⁾を始め、Phongモデル²⁾やBlinnモデル³⁾、標準（拡張）2色性反射モデル^{4,6)}などがよく知られている。それらの研究では、様々な素材でできた物体の表面に合う適切なモデルが用いられ、その妥当性も確認されている。

それら反射モデルの中で、今回、三次元反射モデルのTorrance-Sparrowモデル⁷⁾に着目した。

このモデルも 2 色性反射モデルに分類され、拡散反射と鏡面反射の線形結合で物体表面の反射を記述している。また、このモデルはパラメータを数多く含み、厳密な幾何学反射モデルだとされている。TorranceとSparrowの反射光解釈の最大の特徴は、物体表面の粗さを前提として反射の過程やメカニズムを解明していることで、さらに、「Off-specular maxima (反射光分布における反射の最大が正反射角より大きな角度で生じる現象)」を示し、その現象は表面の凹凸からの相互反射 (masking and shadowing) に起因するとしていることである。

布も繊維を規則的に交錯することで構成され、表面は肉眼では認識し難い凹凸が生じている。また、既報⁸⁾の測定では、微小面でも繊維 1 本相当範囲でも受光角度別の算出輝度平均値が正反射角度より大きい角度で最大となる結果を得た。つまり、TorranceとSparrowが提示した反射光に関する解釈で重なる点が見られた。しかし、TorranceとSparrowの実験試料は金属と不均質誘導体で、布ではなかったこと、また、Torrance-Sparrowモデルの記述式は複雑で、パラメータには根拠に不明確な点があることから、布の反射モデルとして、Torrance-Sparrowモデルをそのまま適用することはできないと考える。

そこで今回、Torrance-Sparrowモデルを解釈の出発点とし、とくに、「表面の凹凸、粗さ」という視点を重視した上で、布からの反射光を測定した結果を独立変数として重回帰分析を行い、布の反射モデルと必要なパラメータの推定を試みた。また、得られたパラメータとその推定値からパス解析を行い、布反射光メカニズムの解析を試みた。

2. 布反射の測定方法

2.1. 試料布

測定に用いた試料布は、シルケット加工 (マーセル加工) した綿繊維 100%の平織布 (以下、S1 と記す)、シルケット未加工の綿平織布 (S2)、シルケット加工した綿の斜文織布 (S3)、綿の朱子織布 (S4)、シルケット加工した綿のニット布 (S5)、シルケット未加工の綿ニット布 (S6)、絹 100%の平織布 (S7)、毛 100%の平織布 (S8)、麻 100%の平織布 (S9)、レーヨン 100%の平織布 (S10)、アクリル 100%の平織布 (S11)、ナイロン 100%の平織布 (S12)、薄地のポリエステル 100%の平織布 (S13)、厚地のポリエステル平織布 (S14) の 14 種類であった。一般に多用されている繊維や織組織、編組織を選択し、比較のために光沢 (シルケット) 加工や布地の厚さも考慮したが、変化織やラメなどを用いた特殊素材は省いた。試料S1 から試料S9 までは天然繊維、試料S10 は半合成繊維、試料S11 から試料S14 までは合成繊維で、未染色の原布とした。その諸元はTable1 に示す。

2.2. 測定方法

まず、試料布表面の画像データを取得した。布の微小面の反射光の特徴を捉えるため、デジタルマイクロスコープ (Dino-Lite Plus) を用い、倍率は 8 倍で撮影した。照明は 27 ワットの蛍光灯 (Panasonic FPL27EX-N) を用いた。試料布表面での照度は 700lxであり、試料布および参照グレースケール全体でほぼ均等な照度になるように調整した。

布反射の解析に基づく反射モデルパラメータの推定

反射光成分を鏡面反射光（Specular Reflection, 以下, S成分, またはSと記す）と拡散反射光（Diffuse Reflection, 以下, D成分, またはDと記す）に分離するために, 光源とマイクロスコープに偏光フィルタのp方向（偏光が入射面に平行）とs方向（偏光が入射面に垂直）をそれぞれ取り付けて撮影し, 試料布すべてについて, D成分のみとS+D成分での画像データを得た。

Table 1 Experimental samples.

| sample label | material | woven pattern | density (end×pick/cm) | thickness (mm) |
|--------------|-----------------------|---------------|-----------------------|----------------|
| S1 | cotton/mercerization | plain | 52×28 | 0.22 |
| S2 | cotton | plain | 52×28 | 0.22 |
| S3 | cotton/mercerization | twill | 45×22 | 0.45 |
| S4 | cotton | satain | 34×52 | 0.28 |
| S5 | cotton/mercerization | knitting | 16×17 | 0.58 |
| S6 | cotton | knitting | 16×17 | 0.75 |
| S7 | silk | plain | 54×40 | 0.12 |
| S8 | wool | plain | 28×23 | 0.32 |
| S9 | linen | plain | 21×22 | 0.24 |
| S10 | rayon | plain | 42×30 | 0.12 |
| S11 | acrylic | plain | 30×28 | 0.29 |
| S12 | nylon | plain | 46×34 | 0.12 |
| S13 | polyester/thin cloth | plain | 40×30 | 0.08 |
| S14 | polyester/thick cloth | plain | 24×26 | 0.32 |

測定（撮影）条件は, 光源から布への入射角度を 45 度に固定し, 受光（撮影）角度は, 0 度（法線方向）から 60 度まで 15 度間隔とした。繊維組織による表面の特徴を勘案して, 試料布の設置方向は経（たて）方向と緯（よこ）方向, バイアス方向の 3 方向とし, それぞれ同様の条件で撮影した。また, すべての撮影において, 較正用グレースケール（Edmond Optics Japan 反射率 81%）を参照体として試料上部に添付し, 試料と同時に撮影した。

測定（撮影）条件は, 光源から布への入射角度を 45 度に固定し, 受光（撮影）角度は, 0 度（法線方向）から 60 度まで 15 度間隔とした。繊維組織による表面の特徴を勘案して, 試料布の設置方向は経（たて）方向と緯（よこ）方向, バイアス方向の 3 方向とし, それぞれ同様の条件で撮影した。また, すべての撮影において, 較正用グレースケール（Edmond Optics Japan 反射率 81%）を参照体として試料上部に添付し, 試料と同時に撮影した。

2.3. 画素値の換算方法

反射光を分離して測定（撮影）したデジタル画像について, マイクロスコープの視角 1 度相当の範囲（縦 50pixels×横 50pixels, 実寸:約 0.17cm×0.17cm）と横方向が視角 3 度相当の範囲（縦 8~11pixels×横 128pixels, 実寸:約 0.03cm×0.42cm）の画素値を画像ソフト (Image J ver.1.33u) によって取得した。ここで, 視角 3 度の場合の縦 8~11pixelsは, 各試料布の織り糸 1 本分におおよそ相当した。受光角度の変角以外にズレが生じないように焦点位置を定めて撮影し, 1 画像から上記 2 種類の範囲（1 度視角, 横 3 度視角）の画素値を各 1 回取得した。

拡散反射 (D) 画像と鏡面反射+拡散反射 (S+D) 画像のいずれも, これらの計測画素値は自動補正されている。そのため, 試料を撮影した場合と同じ条件で, 参照グレースケールの輝度を輝度計 (KONICA MINOLTA LS-110) を用いて測光 (L) し, 撮影された画像内の参照グレースケールに対する画素値 (V) と比較して, 各画素値 (A) に対する輝度値 (B) を $B=A \times (L/V)$ で換算し, 算出した。この方法には, 輝度面に対する RGB 値と測定される輝度値の間に, 線形関係と 0 点の共通性が要求される。今回の画素値から輝度値への換算にはそのような問題点があるが, 換算の簡便性のためこの方法を用いた。

2.4. 布反射の測定項目

反射モデルとなる独立変数候補の布反射データは, 1 度視野範囲 (0.03cm²) の算出輝度の平均,

横 3 度視野範囲 (0.01cm^2) の算出輝度の平均, 横 3 度視野範囲の輝度断面 (1pixel ごとの輝度変化), 輝度断面のフーリエ解析結果による織組織の振幅と周波数とした。いずれも, D 成分と S+D 成分, さらに S 成分のデータがある。

3. 解析方法

3.1. 従属変数となる Y の算出

重回帰分析を行うにあたり, 従属変数となるデータを得る必要がある。Torrance と Sparrow の実験では, 先行研究をもとに 2 つの標本 (実験試料) の反射率分布を予測したが, 反射率は波長 $\lambda = 0.5\mu\text{m}$ の単色光に限定されたものであった。Torrance らの標本も着色されていないが, 本研究で用いた試料布も原布で未染色であるため, 単色光の反射率分布の予測に限定する根拠は乏しいと考える。また今回, 予測の精度を上げるため, 重回帰分析により予測式を求めることとしたが, 反射率を従属変数とするのは適当ではない。そこで, まず, 変角分光測色システム ((株)村上色彩研究所 GCM-4 型) を用い, 先に示した 14 試料布の分光反射率を測定した。試料布の設置方法も, たて方向, よこ方向, バイアス方向の 3 種類とし, 光源の入射角度は 45 度固定, 受光角度は 0 度から 60 度まで 15 度間隔で変角させ, D65 光源 - 2 度視野の条件で測定を行った。この分光反射率結果から次式 (1) により Y (ラージワイ) を算出し, これを重回帰分析の従属変数にすることとした。

なお, 受光角度別の波長 $\lambda = 0.5\mu\text{m}$ の反射率変化と Y の変化は, 14 試料すべてでほぼ同じであることを確認している。

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad \cdots (1)$$

3.2. 重回帰分析

これまでの布の測定・算出結果のうち, 重回帰分析の独立変数の候補となりうる結果は, Table2 の通り, 「布輝度 (Luminance of Fabric : L.F.)」と変数名を付けた 1 度視野範囲の算出輝度平均値と「織糸輝度 (Luminance of Weaving Yarn : L.W.Y.)」とラベル付けした横 3 度視野範囲の算出輝度平均値, 表面の凹凸の示す「粗さ (Surface Roughness : S.R.)」, 「振幅 (Amplitude : A.)」, 「周波数 (Frequency : F.)」である。さらに, それぞれ S 成分と D 成分, S+D 成分が抽出できたが, 周波数は各成分ともほぼ同値を示したため分離していない。Torrance らは実験試料表面の粗さを触針式粗さ計で計測したが, 布は軟質であるため計測が困難であった。よって, 次の算術平均粗さ (Ra) を求める式 (JIS B0601-2001) ⁹⁾ を援用して, 輝度断面のデータから反射による表面形状の粗さを算出し定量化した。

$$\text{算術平均粗さ : } Ra = 1/l \int_0^l |f(x)| dx \quad \cdots (2)$$

独立変数はTable2 に示した各算出・測定値を候補として、ステップワイズ式変数選択法により絞り込み、反射モデルとなりうる変数を 14 試料布それぞれで明らかにした。とくに、一つの画像からいくつかの算出・測定結果を得たことから、多重共線性が問題となるが、標準誤差を確認することにより、相関の高すぎる変数を除去し、標準偏回帰係数が統計的に安定するよう試みた。

Table 2 Details in results of measurement that become independent variables.

| variable label | reflection component | contents of measurement |
|-----------------------------------|----------------------|--|
| Luminance of Fabric [L.F.] | S, D, S+D | Average of relative luminance of 1° observer. |
| Luminance of Weaving Yarn [L.W.Y] | S, D, S+D | Average of relative luminance of 3° observer. |
| Surface Roughness [S.R.] | S, D, S+D | Surface roughness calculated from luminance profile. |
| Amplitude [A.] | D, S+D | Result of analyzing luminance profile by Fourier analysis. |
| Frequency [F.] | - | Result of analyzing luminance profile by Fourier analysis. |

Notes. [S]: Specular reflection, [D]: Diffuse reflection, [S+D]: Specular + Diffuse reflection. Exact size of 1° observer: 50×50pixels (0.17×0.17cm), 3° observer: 8×11×128pixels (0.03×0.42cm).

また、今回はすべての重回帰分析で、修正済決定係数 R^2 が 0.9 以上を示したため、予測値の当てはまり（モデルの寄与率）の判断が不明確となった。そこで、AIC（赤池の情報量基準：Akaike's Information Criterion）によって、選択した変数の適合を確認した上で、重回帰式と予測される値を求めた。

重回帰分析と係る計算には、Excel 2003（Microsoft）とアドインソフトのエクセル統計 2004（(株)社会情報サービス）を用いた。

3.3. パス解析

予測値を得るための近似式を明らかにする重回帰分析では、独立変数間の関係は考察の対象とならない。そこで、重回帰分析を利用し、パス解析（path analysis）¹⁰⁻¹²⁾を行うこととした。パス解析は、統計モデルの一つで、構成概念を伴わない構造方程式モデル（structural equation model without latent variables）と呼ばれることが多く、「3.2.」に示した重回帰分析により整理、抽出した独立変数間すべての因果関係をパス図に表し、それらの関係について統計的な推論を行うものである。

今回、従属変数とした試料布のY（Torranceらが予測した波長 $\lambda=0.5\mu\text{m}$ での反射率に代わる測定結果）の受光角度別の変化のメカニズムを明らかにするために、パス解析を行った。つまり、重回帰分析で得られた標準偏回帰係数はパス係数と呼ばれるが、それらから因果的影響を解釈するパス解析を行い、Yの生成メカニズムをモデル（因果モデル）化した。

4. 結果

4.1. Yの受光角度別変化

前述の通り、Yを重回帰分析の従属変数としたが、Fig.1 は 14 試料のYの受光角度（AOR）別変化を設置布方向ごとに示したものである。いずれの試料布もすべての設置布方向で、受光角度の変化とともにYの値が増加し、正反射角度 45 度を越えた 60 度で最も高い値となった。これ

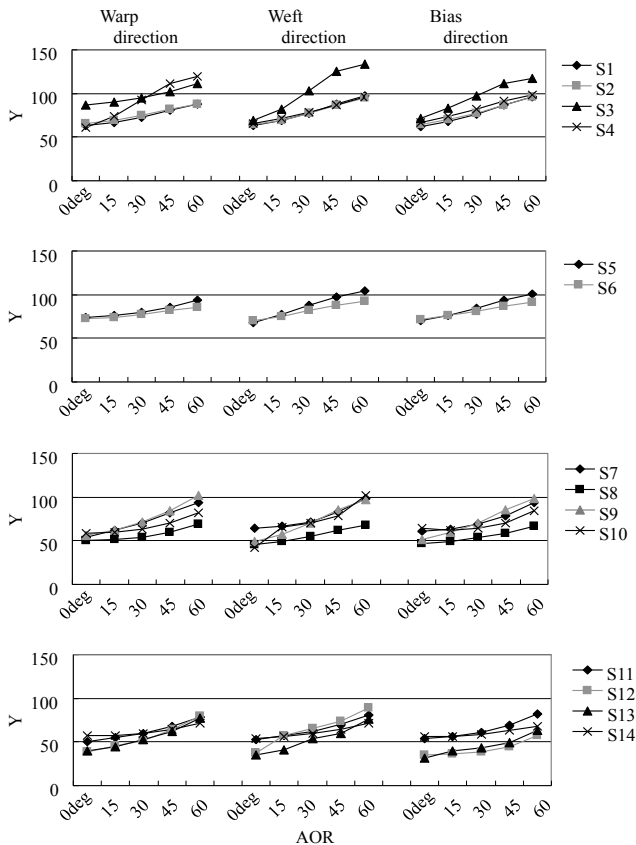


Fig.1 Transition of Y according to AOR

Table 3 Results of two-factor ANOVE analyzed about surface roughness.

| sample | factor | F value | | factor | F value | |
|--------|--------|-----------|----------|--------|----------|----------|
| No. | sd/ra | D | S+D | sd/ra | D | S+D |
| S1 | sd | 8.12 * | 7.36 * | ra | 7.00 * | 8.48 ** |
| S2 | sd | 102.89 ** | 48.00 ** | ra | 20.37 ** | 19.98 ** |
| S3 | sd | 85.01 ** | 63.66 ** | ra | 1.51 | 6.00 * |
| S4 | sd | 16.54 ** | 17.94 ** | ra | 0.57 * | 1.52 * |
| S5 | sd | 48.05 ** | 24.44 ** | ra | 5.26 * | 3.21 |
| S6 | sd | 14.14 ** | 10.97 ** | ra | 0.54 | 1.91 |
| S7 | sd | 19.47 ** | 23.12 ** | ra | 3.13 | 5.23 * |
| S8 | sd | 0.80 | 1.63 | ra | 11.41 ** | 7.27 ** |
| S9 | sd | 8.12 * | 6.77 * | ra | 0.70 | 0.45 |
| S10 | sd | 4.89 * | 5.19 * | ra | 0.86 | 1.31 |
| S11 | sd | 6.39 * | 3.66 | ra | 14.79 ** | 22.30 ** |
| S12 | sd | 25.50 ** | 8.70 ** | ra | 3.08 | 1.31 |
| S13 | sd | 28.06 ** | 18.55 ** | ra | 4.86 * | 4.13 * |
| S14 | sd | 29.92 ** | 23.61 ** | ra | 1.94 | 7.45 ** |

 Significance: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

Notes. factor [sd]: setting direction, [ra]: receiving angle.

は、粗い表面からの反射光のピークは正反射角度からずれるとした Torrance と Sparrow の示唆内容に沿う結果となった。ただし、各試料布で最大値や変化の割合は異なった。同じ綿繊維でも、斜文織の試料 S3 は受光角度別の Y の変化率が大きかったのに対し、ニット（編物）の試料 S5 と S6 は変化の割合は低かった。また、同じ平織でも、麻繊維の試料 S9 は Y の受光角度別変化が大きかったのに対し、合成繊維である試料 S11 から試料 S14 は Y の値自体が低かった。つまり、繊維や織組織の種類、設置布方向といった表面の状態により受光角度別の Y の変化は異なったが、Y が正反射角度より大きい角度で最大となることは共通していた。

4.2. 重回帰分析

4.2.1. 変動要因（変数選択）

「3.2.」の解析方法で示した算術平均粗さ式 (2) によって、表面形状の粗さを定量化し、結果について受光角度 (ra) と設置布方向 (sd)、繊維の種類について繰り返しのない 2 元配置の分散分析を行った。Table 3 に受光角度と設置布方向の結果を示す。設置布方向については、毛の平織布 (S8) 以外の 13 試料布で有意差が認められたが、受光角度については、D 成分か S+D 成分、あるいは両方で有意差が認められない試料布が 8 種類あった。

14 試料のうち、試料 S3, S7, S10, S12 の表面形状の粗さの結果を Table 4

布反射の解析に基づく反射モデルパラメータの推定

Table 4 Change of surface roughness according to AOR

| AOR | S3 | | | | | |
|-------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
| | warp direction | | weft direction | | bias direction | |
| | D | S+D | D | S+D | D | S+D |
| 0deg | 1.33 | 1.60 | 0.71 | 0.82 | 1.08 | 1.20 |
| 15deg | 1.36 | 1.62 | 0.63 | 0.69 | 1.28 | 1.45 |
| 30deg | 1.49 | 1.89 | 0.59 | 0.75 | 1.37 | 1.65 |
| 45deg | 1.46 | 2.14 | 0.64 | 0.95 | 1.31 | 1.77 |
| 60deg | 1.22 | 1.48 | 0.66 | 0.77 | 1.10 | 1.19 |
| AOR | S7 | | | | | |
| | warp direction | | weft direction | | bias direction | |
| | D | S+D | D | S+D | D | S+D |
| 0deg | 1.01 | 1.40 | 1.33 | 2.24 | 0.77 | 0.98 |
| 15deg | 1.21 | 1.36 | 1.51 | 2.15 | 0.76 | 0.96 |
| 30deg | 1.20 | 1.40 | 1.57 | 2.20 | 0.75 | 0.97 |
| 45deg | 1.02 | 1.00 | 1.29 | 1.99 | 0.65 | 0.92 |
| 60deg | 0.97 | 0.55 | 0.78 | 0.99 | 0.65 | 0.82 |
| AOR | S10 | | | | | |
| | warp direction | | weft direction | | bias direction | |
| | D | S+D | D | S+D | D | S+D |
| 0deg | 0.67 | 1.97 | 1.27 | 1.46 | 1.05 | 1.21 |
| 15deg | 0.89 | 1.94 | 1.75 | 2.32 | 1.33 | 1.38 |
| 30deg | 1.02 | 1.82 | 2.26 | 3.14 | 1.05 | 1.24 |
| 45deg | 1.06 | 1.79 | 1.81 | 2.76 | 0.80 | 1.09 |
| 60deg | 1.33 | 1.55 | 0.96 | 1.16 | 0.79 | 1.13 |
| AOR | S12 | | | | | |
| | warp direction | | weft direction | | bias direction | |
| | D | S+D | D | S+D | D | S+D |
| 0deg | 0.58 | 1.23 | 0.49 | 0.65 | 0.37 | 0.44 |
| 15deg | 0.84 | 1.30 | 0.88 | 1.36 | 0.34 | 0.40 |
| 30deg | 0.89 | 1.14 | 1.11 | 1.76 | 0.39 | 0.42 |
| 45deg | 0.84 | 1.00 | 0.89 | 1.52 | 0.30 | 0.45 |
| 60deg | 0.69 | 0.64 | 0.79 | 0.71 | 0.33 | 0.48 |

Table 5 Multiple regression model that were suited as independent variables.

| sample label | Independent variables | R ² | AIC |
|--------------|--|----------------|-------|
| S1 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(S)/ A.(D)/ F. | 0.99 | 44.39 |
| S2 | L.W.Y.(D)/ L.W.Y.(S)/ S.R.(S)/ A.(D)/ F. | 0.97 | 67.51 |
| S3 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(S+D)/ A.(S+D)/ F. | 0.99 | 71.61 |
| S4 | L.W.Y.(D)/ L.W.Y.(S)/ S.R.(D)/ A.(D)/ F. | 0.99 | 65.93 |
| S5 | L.W.Y.(D)/ L.W.Y.(S)/ S.R.(S+D)/ A.(S+D)/ F. | 0.99 | 52.80 |
| S6 | L.W.Y.(D)/ L.W.Y.(S)/ S.R.(S+D)/ A.(S+D)/ F. | 0.98 | 50.70 |
| S7 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(S+D)/ A.(S+D)/ F. | 0.98 | 71.62 |
| S8 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(D)/ A.(D)/ F. | 0.93 | 70.71 |
| S9 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(S+D)/ A.(S+D)/ F. | 0.99 | 58.53 |
| S10 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(S)/ A.(D)/ F. | 0.97 | 74.41 |
| S11 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(D)/ S.R.(S+D)/ A.(D)/ A.(S+D)/ F. | 0.93 | 79.67 |
| S12 | L.W.Y.(D)/ L.W.Y.(S)/ L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(S)/ A.(D)/ F. | 0.97 | 81.51 |
| S13 | L.F.(D)/ L.F.(S)/ S.R.(S+D)/ A.(S+D)/ F. | 0.95 | 83.89 |
| S14 | L.W.Y.(D)/ L.W.Y.(S)/ S.R.(D)/ A.(D)/ F. | 0.98 | 40.33 |

Notes. [L.T.]: Luminance of Textile, [L.T.T.]: Luminance of Textile Thread, [S.R.]: Surface Roughness, [A.]: Amplitude, [F.]: Frequency, [D]: Diffuse Reflection, [S]: Specular Reflection.

に示す。試料S3 では、バイアス方向とたて方向で、D成分とS+D成分の輝度断面形状が相似し、断面凹凸の幅と高さは受光角度0度から45度にかけて大きくなり、60度で小さくなった。よこ方向では、断面の凹凸の差が小さく、受光角度の差も顕著でなかった。Table4には、その状態変化を数値として示すことができた。同様に他の3試料についても粗さの変化が定量化され、試料S7と試料S10のたて方向では、D成分とS+D成分の受光角度別の変化が異なったこと、試料S12のバイアス方向では、D成分とS+D成分の断面がほぼ同じで5受光角度での変化も小さかったことが算術平均粗さ式による結果で示された。

これら以外の試料布についても、断面形状の変化を数値化できたが、Table3の分散分析結果で示した通り、統計的な差が認められなかった変化もあった。それらは、同一設置布方向において、表面の粗さ（形状）が相似したまま、受光角度に従い算出輝度のみが変化した試料であった。

この粗さを含む独立変数候補はTable2に示した通りであるが、ステップワイズ式変数選択法により重回帰分析を繰り返し、独立変数を絞り込んだ。AICが相対的に高く、反射モデルとなりうる変数を14試料布で明らかにした結果は、Table5の通りである。

候補とした独立変数は合計12変数あったが、試料布ごとに5変数ないし、7変数を選択することができた。それらの中で、算出輝度平均値は重要な変数であることが推測されるが、布輝度

(L.F.) と変数名を付けた 1 度視野範囲の算出輝度平均値と、織糸輝度 (L.W.Y.) とラベル付けした横 3 度視野範囲の算出輝度平均値のいずれかが各試料布で選択された。シルケット加工がされていない試料布やニット (編組織), 厚みのある試料布では、織糸輝度 (L.W.Y.) が選択された。

また反射において、試料とした布が平滑な表面の物体と異なる点は、織・編組織による表面の凹凸の有無である。これは、布反射のメカニズムを捉える上で重要な要因であり、TorranceとSparrowが指摘した、「micro facet」による「masking and shadowing」を布反射で解釈する際に欠くことができないものだと考える。今回、14 試料布すべてで、表面の凹凸の示す粗さ (S.R.) と振幅 (A.), 周波数 (F.) が変数として選択された。

4.2.2. 重回帰分析結果

選択した独立変数による重回帰式から得た理論値と観測値であるYとの残差を試料布ごとに整理した。残差の最も大きい値から小さい値までをTable6に示す。残差の最大値から最小値までの差が大きかったのは、試料S10, S12, S13であったが、これらは半合成繊維と合成繊維で布光沢が強すぎるとされる布である。これらの光沢は上質な感じではなくガラガラした光沢感がある。それ以外では、残差の差が小さく、良好な予測結果となった。

また、残差の差が大きかった試料S13と小さかった試料S14について、受光角度ごとにYと理論値を比較した結果はそれぞれFig.2とFig.3に示す。残差の小さかった試料S14では、ほぼ予測値がYの変化と重なり、残差の大きかった試料S13でも、二つの角度で予測値が異なったが、顕著な差ではなかった。他の試料布でも、理論値の当てはまりの良い予測式と変数を得ることができた。

Table 6 Residual error: Results of multiple regression.

| sample label | residual error | (Y - predicted value) | ~ | residual error | (Y - predicted value) |
|--------------|----------------|-----------------------|---|----------------|-----------------------|
| S1 | -1.24 | (73.11-74.35) | ~ | 1.24 | (69.03-67.79) |
| S2 | -2.00 | (76.87-78.87) | ~ | 2.67 | (64.15-61.48) |
| S3 | -3.46 | (97.20-100.66) | ~ | 2.58 | (133.27-130.69) |
| S4 | -2.11 | (74.28-76.39) | ~ | 2.67 | (82.48-79.81) |
| S5 | -1.75 | (79.93-81.68) | ~ | 1.18 | (73.88-72.70) |
| S6 | -1.58 | (88.08-89.66) | ~ | 1.35 | (77.68-76.33) |
| S7 | -2.55 | (81.93-84.48) | ~ | 2.50 | (94.19-91.69) |
| S8 | -2.64 | (59.24-61.88) | ~ | 3.17 | (61.54-58.37) |
| S9 | -2.68 | (62.18-64.86) | ~ | 1.76 | (85.30-83.54) |
| S10 | -2.70 | (41.63-44.33) | ~ | 4.05 | (64.61-60.56) |
| S11 | -3.53 | (50.83-54.36) | ~ | 2.31 | (53.04-50.73) |
| S12 | -3.95 | (45.39-49.34) | ~ | 3.44 | (36.14-32.70) |
| S13 | -4.56 | (35.73-40.29) | ~ | 4.96 | (39.65-34.69) |
| S14 | -1.29 | (59.77-61.06) | ~ | 0.92 | (71.41-70.49) |

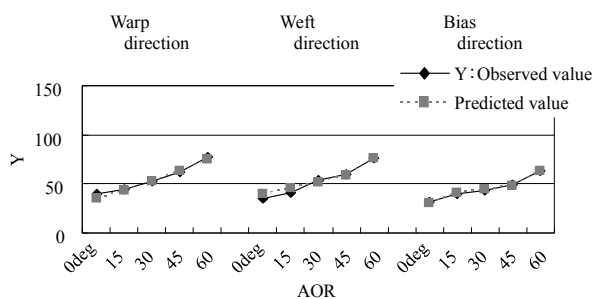


Fig.2 Comparison between observed value and predicted value about S13

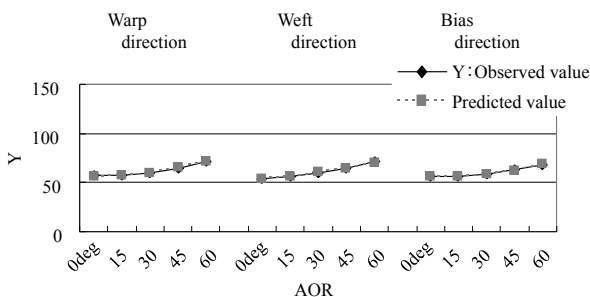


Fig.3 Comparison between observed value and predicted value about S14

布反射の解析に基づく反射モデルパラメータの推定

なお、それぞれの回帰式は次に示す通りである。

試料S13 の回帰式：

$$Y = 8.39 \times [\text{布輝度(D)}] + 2.73 \times [\text{布輝度(S)}] + 0.56 \times [\text{粗さ(S+D)}] - 1.43 \times [\text{振幅(S+D)}] + 0.42 \times [\text{周波数}]$$

… (3)

試料S14 の回帰式：

$$Y = 10.04 \times [\text{織糸輝度(D)}] + 5.16 \times [\text{織糸輝度(S)}] + 4.67 \times [\text{粗さ(D)}] - 1.35 \times [\text{振幅(D)}] + 0.6 \times [\text{周波数}]$$

… (4)

以上の通り、AICに留意して重回帰分析の独立変数を選択した結果、擬似相関の影響が除去された。よって、変数としての適確判別が難しく、かつ多数の測定値および算出値 (Table2) から、布反射モデルとなる適切な数の変数を抽出することができ、要因分析が可能となった。

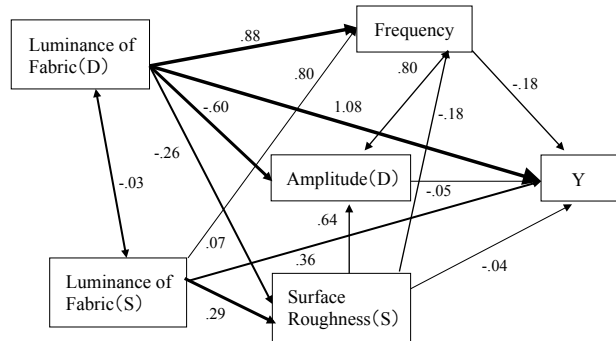


Fig.4 Result of the path analysis by independent variables: S1

4.3. パス解析結果

TorranceとSparrowが示唆した「Off-specula maxima」に相当すると考えた、受光角度別のYの変化のメカニズムを捉えるために、パス解析を行った。まず、選択された独立変数すべてを因果モデル（反射モデル）として解析を行った。試料S1の結果をFig.4に示す。

既述の通り、重回帰分析により精度の高い回帰式を導出できたが、要因を的確に解析するには選択された変数が5ないし7と多く、Fig.4に示した通り、変化の要因や関わる効果が不明瞭となった。そこで、パス係数（標準偏回帰係数）に有意差 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$) が認められた変数をTable7に示すとともに、Table5に示した独立変数のうち相互の相関係数に有意差が認められた変数によって、再度パス解析を試みた。

Table 7 Multiple regression model that were admitted by significant difference.

| sample label | independent variables: standard partial regression coefficient |
|--------------|---|
| S1 | L.F.(D): 1.08**/ L.F.(S): 0.36**/ F.: -0.18** |
| S2 | L.W.Y.(D): 0.98**/ L.W.Y.(S): 0.54**/ A.(D): -0.14*/ F.: -0.32** |
| S3 | L.F.(D): 0.95**/ L.F.(S): 0.33**/ S.R.(S+D): 0.29**/ A.(S+D): -0.20** |
| S4 | L.W.Y.(D): 0.84**/ L.W.Y.(S): 0.26**/ S.R.(D): -0.18* |
| S5 | L.W.Y.(D): 0.82**/ L.W.Y.(S): 0.45**/ F.: -0.34** |
| S6 | L.W.Y.(D): 0.70**/ L.W.Y.(S): 0.71**/ F.: 0.31** |
| S7 | L.F.(D): 0.93**/ L.F.(S): 0.42** |
| S8 | L.F.(D): 0.31*/ L.F.(S): 0.24*/ F.: 0.58** |
| S9 | L.F.(D): 0.75**/ L.F.(S): 0.40** |
| S10 | L.F.(D): 1.18**/ L.F.(S): 0.89**/ S.R.(S): -0.15*/ A.(D): -0.27*/ F.: -0.25* |
| S11 | L.F.(D): 0.96** |
| S12 | L.W.Y.(D): 1.38*/ L.W.Y.(S): -2.70**/ L.F.(S): 2.73**/ A.(D): 0.24*/ F.: 0.35** |
| S13 | L.F.(D): 0.61** |
| S14 | L.W.Y.(D): 0.80**/ L.W.Y.(S): 0.82**/ A.(D): -0.28**/ F.: 0.32** |

Significance: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

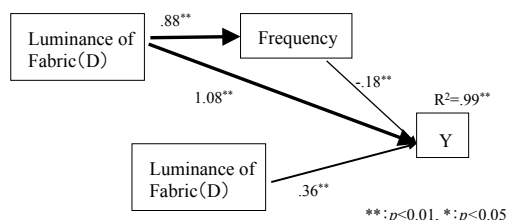


Fig.5 Result of the path analysis by independent variables that were significant differences: S1

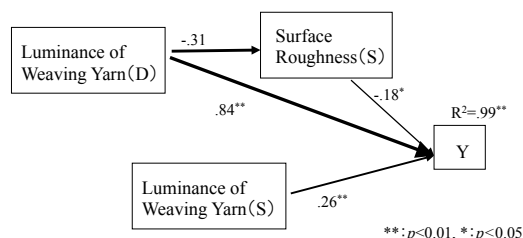


Fig.6 Result of the path analysis by independent variables that were significant differences: S4

Fig.5 に試料S1 の再解析結果を示す。Fig.4 では反射のメカニズムを詳細に分析することが可能だったが、統計的に有用でない関係まで含まれた。それに対し、Fig.5 では布からの反射光量が正反射を超えた角度で最大となるYの変化のメカニズムを簡潔に捉えることができた。

また、Fig.6 には試料S4 の結果を示す。Fig.5 とFig.6 は、一見すると似ているが、Yが受光角度に伴って変化する挙動の要因が異なっていることを示している。つまり、すべての試料布において、受光角度の変化（0度から60度）とともにYの値も大きくなり、60度でピークとなったが、綿繊維の平織布である試料S1では、1度視野範囲での拡散反射光と鏡面反射光の算出輝度の変化にその要因があった。それに対し、同じ綿繊維であるが織組織によって布光沢を表出させた朱子織の試料S4では、横3度視野範囲（織糸1本に相当する範囲）での拡散反射光と鏡面反射光の算出輝度の変化にその要因があることがこれらのパス図により明らかとなった。

因果関係を分析すると、試料布S1では、「布輝度（D）（受光角度に伴う1度視野範囲の拡散反射光の算出輝度）」のYへの直接的効果は1.08、「布輝度（S）」の直接効果は0.36となり、Yの変化に対しては、「布輝度（S）」より「布輝度（D）」の方が大きな効果をもたらした。また、「布輝度（D）」が増加する変化は「周波数」が減少する変化に影響されて少し小さくなったため、Yへの間接効果は、-0.16となったが、直接効果と合わせた総合効果は、0.92となり、Yの変化に対する効果は「布輝度（S）」より大きいことは変わらなかった。

試料S4では、「織糸輝度（D）（受光角度に伴う横3度視野範囲の拡散反射光の算出輝度）」のYへ直接効果は0.84、「織糸輝度（S）」の直接効果は0.26となり、「織糸輝度（D）」の方がより大きく影響した。さらに、「粗さ（S）（織糸1本分の拡散反射光の算出輝度変化）」の直接効果は、-0.18で、「織糸輝度（D）」との相関関係に有意差は認められず、「粗さ（S）」が小さくなることによる「織糸輝度（D）」からの間接効果も、0.06と些少であったが、「織糸輝度（D）」の総合効果は0.90まで上がり、「織糸輝度（S）」よりYへの効果が総合でも大きいことが示された。

Fig.7 には試料S7の解析結果を示す。S7は天然繊維の絹であるが、S9の麻とともに上質な布光沢があるとして高級衣料に用いられる繊維である。図にはS7のみを示した

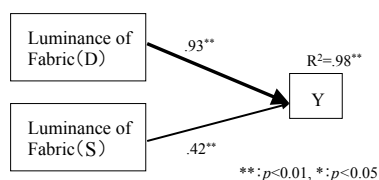


Fig.7 Result of the path analysis by independent variables that were significant differences: S7

が、S9についても標準偏回帰係数が少し異なるだけで、同様のパス解析結果となった。これらは、粗さや周波数といった織組織や表面構造による影響は小さく、繊維自体の反射がYの変化の直接要因であったことが明らかとなった。また、直接効果については、「布輝度 (D)」の方が「布輝度 (S)」より高い値を示したが、同じ天然繊維の綿布と比較すると、鏡面反射成分の値が高かった。

Fig.8には試料S10の解析結果を示す。「布輝度 (D)」のYへの直接的効果は1.18,「布輝度 (S)」の直接効果は0.89で、試料S1やS4とは異なり、Yの変化に対する効果は、「布輝度 (D)」と「布輝度 (S)」で大きな差はなかった。また、「粗さ (S)」「振幅 (D)」「周波数」の直接効果は、それぞれ、-0.15, -0.27, -0.25となったが、「周波数」と「振幅 (D)」が受光角度に従い減少することで、「布輝度 (D)」の総合効果は1.07となったのに対し、「布輝度 (S)」の総合効果は0.82となり、効果がより拮抗したことが示された。光沢が強すぎることを既に記述した試料S10は、絹の光沢を目指して開発された半合成繊維レーヨンであるが、その布光沢は「安っぽい光沢」と評されている。これは、鏡面反射光が強く影響していることが、数値の上でも理解することができた。

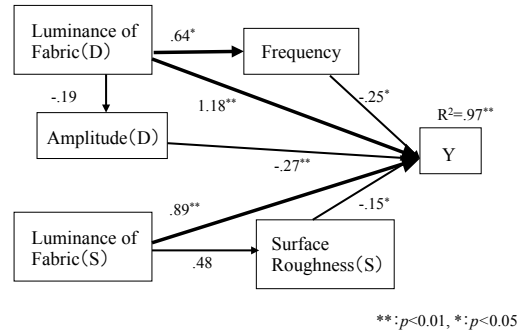


Fig.8 Result of the path analysis by independent variables that were significant differences: S10

Fig.9には試料S11の解析結果を示す。天然繊維の毛の特徴を再現するために開発された合成繊維のアクリルで、合成繊維特有の透明感があるが、目視では光沢が感じられない試料布である。パス解析した結果でも、Yのデータ挙動に影響していたのは布輝度 (D) のみであった。

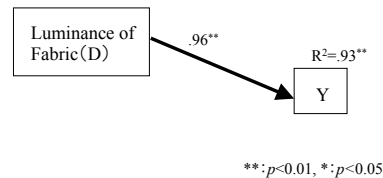


Fig.9 Result of the path analysis by independent variables that were significant differences: S11

5. 考察

TorranceとSparrowが示唆した「Off-specula maxima」と同様、試料布の分光反射率から算出したYも受光角度が0度から60度に変化するに従い値が増し、正反射角より大きい角度でピークとなった。また、先行研究においても、布からの反射光量が正反射方向で必ずしも最大とならない現象が見出されている¹³⁾。そこで、これまでに測定した布からの反射データに基づいて、この現象を解明し、布反射モデルとそのパラメータの推定を試みた。

TorranceとSparrowは、粗い表面（彼らの実験では $\sigma m = 1.3 \mu m, 1.9 \mu m$ の試験片）からの反射光を、(1) 粗い表面はランダムに配置された小さな鏡面から構成される、(2) 粗い表面からの反射の基礎メカニズムは、(1)の面からの鏡面反射と多重反射あるいは内部散乱による拡散反射との和である、(3) 拡散反射成分は表面の凹凸によって生じる反射と陰（masking and shadowing）の

繰り返しによる効果からなる, (4) これらのメカニズムは表面の粗さと波長の比 ($\sigma m/\lambda$) が 1 より大きい場合に適用されると特徴付けた。

また彼らは, 粗い表面では入射角の増加に従い出現する反射のピークは正反射方向とはならない現象 (Off-specula maxima) を捉えた。さらに, そのピークのずれは単色光では次式 (5) により予測可能であるとし, $\lambda=0.5\mu m$ での観測値 (反射率) との比較で提示した。

$$\rho(\psi; \theta, \phi) / \rho(\psi; \psi, 0^\circ) \\ = gF(\psi', \hat{n}) [G(\psi p, \theta p) / \cos \theta] \exp(-c^2 \alpha^2) + \cos \psi / g [F(\psi, \hat{n}) / \cos \psi] + \cos \psi \\ \dots (5)$$

式 (5) では, 右辺にある「定数g」が試験片の素材によって異なり, また, 同じく右辺「 $-c^2 \alpha^2$ 」の「c」が粗さを示す定数で, 表面の粗さによって値が相違するとしている。

Torranceらが示した特徴の (1) と (2) については, 布反射の基礎事項としても共通して理解可能である。(3) については, 布の織組織から輝度断面として実測できた。

Torranceらと異なるのは, 今回, 重回帰分析を用いて布反射モデルとそのパラメータの予測を行うこととし, 従属変数をY, 独立変数を実測した布の反射データとした点である。粗さについても, Torranceらが粗さを実測と予測式から得た結果から, 0.01~0.20 の間で適切な値を評価したのに対し, 今回, 布表面からの反射光断面の状態について, 算術平均粗さ式を以って粗さを定量化し算出した。また, Torranceらのように実験素材の違いに定数g, 拡散成分をLambert法則で一律に値を与えるのではなく, 上記の通り, 試料布微小面の各詳細な反射データを基にした。

Torranceらの知見をベースに, また, 統計的に安定した結果となるよう留意して重回帰分析を行ったため, 反射モデルとなる変数が 5 から 7 となり, 実測したYに近い当てはまりの良い予測式が求められた。

また, Yの変化の因果関係を捉え, 布反射のメカニズムを解明するためにパス解析を行ったが, 試料布によって解析モデルとパラメータが異なり, それぞれの試料布のメカニズムを詳細に捉えることができた。綿繊維の試料布では拡散反射成分, 平織の試料布では微小面の算出輝度変化, 朱子織の試料布では織糸 1 本分の算出輝度変化が反射要因として強く影響していた。また, 布光沢の強い試料布では, 微小面からの拡散反射成分と鏡面反射成分のいずれも影響が大きいことが明らかとなった。

6. おわりに

今回, 布反射のメカニズムにおいて誤差要因をなるべく排除するため, 未染色布のみを検討した。今後, 染料の染着量や染色メカニズムを考慮しながら, 染色布の反射光解析を試みる予定である。

引用文献

- 1) M.Oren, S.K.Nayar: Generalization of Lambert's Reflectance Model, ACM 20st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), 1994,239-246
- 2) B. T. Phong : Illumination for computer generated pictures, Communication of the ACM, Vol.18,1975, 311-317
- 3) J. F. Blinn : Models of light reflection for computer synthesized pictures, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH), 1977,192-198
- 4) S. Tominaga, B. A. Wandell : The standard surface reflectance model and illuminant estimation, J. Opt. Soc. Am 6(4), 1989,576-584
- 5) 田中法博, 富永昌治 : 3次元反射モデルの解析と推定, 情報処理学会論文誌, vol.41,No.SIG10,2000, 1-11
- 6) 三宅洋一編 : 分光画像処理入門, 東京大学出版会, 2006,37-61
- 7) K. Torrance, E. Sparow : Theory for off-specular reflection from roughened Surfaces, Journal of the Optical Society of America, Vol.57, No.9,1967,1105-1114
- 8) 坂上ちえ子 : マイクロスコープを用いた輝度及び輝度分布の推定法, 鹿児島県短紀要, 63,2012, 1-17
- 9) JIS B0601 : 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面性状 : 輪郭曲線方式 - 用語, 定義及び表面性状パラメータ, 2001
- 10) 豊田秀樹 : 共分散構造分析 [入門編], 朝倉書店, 1998,279
- 11) 豊田秀樹 : 共分散構造分析 [応用編], 朝倉書店, 2000,149-158
- 12) 小島隆矢 : Excelで学ぶ共分散構造分析とグラフィカルモデリング, オーム社, 2003,78-89
- 13) 日本色彩学会編 : 色彩科学ハンドブック第2版, 東京大学出版会, 1992,1115-1117

